

유한요소해석에 의한 측방이동 방지효과에 대한 연구

A Study on the Prevention Effect of Lateral Movement by Finite Element Analysis

박 춘 식¹ Park, Choon-Sik

노 태 경² Rho, Tae-Kyung

Abstract

This study presents a reasonable and economical DCM reinforcement length for the various factors (the embankment height, the distance from the embankment to the underground structure, the depth of the soft ground, and the compression index and the swelling index of the soft ground) that affect the stability of the structure due to lateral movement. Based on these results, we analyzed each factor's degree of influence and figured out which factor influenced the lateral movement most. The cross section of the embankment on the soft ground was modeled by using the Finite Element Program and reinforced with DCM. The results show that the increase rate of the reinforcement length with the increase of the embankment height is about 9~50%, the increase rate of the reinforcement length with the depth of soft ground is about 13~30%, and the increase rate of the reinforcement length with increasing compression index is about 3~25%. In addition, the influence of each factor on each other was analyzed. As a result, among the separation distance, the compressive index and the maximum to minimum slope ratio of the reinforcement length of the embankment height, the separation distance was the largest for the depth of soft ground. As the depth of the soft ground increases, the ratio of the maximum to minimum slope of the reinforcement length according to the embankment height is 3.75, the ratio of the maximum to minimum slope of the reinforcement length according to the spacing distance is 4.3, and the ratio of maximum to minimum slope according to compression index is 2.5. From these results, it is confirmed that the three factors are greatly affected by the depth of soft ground.

요 지

본 연구는 측방이동으로 인한 구조물의 안정성에 영향을 주는 각 인자(성토 높이, 성토부로부터 지하매설물까지의 이격 거리, 연약지반의 깊이, 연약지반의 압축지수 및 팽창지수)별에 대한 합리적이고 경제성 있는 보강길이를 제시하였다. 이러한 결과들을 토대로 각 인자들의 영향 정도를 파악하고, 어떠한 인자가 측방이동에 가장 영향을 미치는가를 파악하였다. 유한요소 해석프로그램을 이용하여 연약지반 상에 성토가 이루어지는 경우의 단면을 모델링하여 해석을 수행하였으며, 연약지반의 보강은 심층혼합공법(DCM)을 이용하였다. 그 결과 성토 높이 증가에 따른 보강길이의 증가율은 약 9~50%, 연약지반 심도 증가에 따른 보강길이의 증가율은 약 13~30%, 성토부로부터 지하 매설물의 이격 거리 감소에 따른 보강길이의 증가율은 약 7~25%, 압축지수 증가에 따른 보강길이의 증가율은 약 3~25%로

1 정회원, 창원대학교 토목환경화학융합공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Environment Chemical Engrg., Changwon National Univ., Tel: +82-55-213-3772, Fax: +82-55-285-9491, pcs@changwon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 창원대학교 친환경해양플랜트 FEED공학 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Eco Friendly Offshore FEED Engrg., Changwon National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

나타났다. 또한 각 인자별로 서로에 대한 영향성을 분석하였다. 그 결과 연약지반 심도의 보강길이 최대 최소 기울기 비는 이격거리 변화에 큰 영향을 받았으며 이외의 인자들은 연약지반 심도의 변화에 따라 최대 최소 기울기 비가 큰 영향을 받았다. 한편 연약지반의 심도가 깊어질수록 성토높이에 따른 보강길이의 최대-최소기울기의 비는 3.75, 이격 거리에 따른 보강길이의 최대-최소기울기의 비는 4.3, 압축지수에 따른 최대-최소기울기의 비는 2.5로 나타났다. 이를 통해 세 개의 인자는 연약지반의 심도에 대한 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다.

Keywords : Lateral movement, Soft ground, Finite element analysis, Deep mixing method, Compression index

1. 서론

연약지반은 공학적 성질을 파악하기에 매우 어려운 특성을 가지고 있다. 여러 실내시험을 실시하여 공학적 성질을 파악한다 하더라도 그 값은 기존에 제시되어 있는 Terzaghi and Peck(1967)의 관계식인 $C_c = 0.009(W_L - 10)$ 혹은 Skempton(1944)의 관계식인 $C_c = 0.007(W_L - 10)$ 에 해당하는 정수 값이 나오기가 힘들다. 또한 연약지반의 분포 자체가 전국 어디에서나 쉽게 접할 수 있는 지반이 아니기 때문에 연약지반 상에 부지를 조성하고 구조물을 설치할 경우 안정성을 확립하기 위해 정밀한 설계와 적절한 연약지반 대책공법 등은 필수적이다. 특히 교대의 뒤택움이나 도로 성토 등은 하부에 있는 연약지반의 압밀 침하를 발생시킨다. 이는 연약지반의 측방이동을 발생시키고 기초에 이 이동을 통한 압력을 통해 상부교량에 피해를 주게 된다.

연약지반 상에 성토에 따라 발생하는 측방이동은 Peck(1969)에 의해 처음 공학적으로 정의되었으며, 1973년도 모스크바에서 개최된 국제토질기초회의에서 Tschebotarioff(1973)가 점성토 지반상의 수평방향의 토압에 의한 말뚝의 거동을 발표하였다. Tominaga and Hasimoto(1974)는 성토 중앙부의 침하량과 성토법면 선단부의 수평 변위량 사이의 관계를 통하여 안정조건을 판정하였다. 이어서 Matsuo and Kawamura(1977)는 성토파괴 사례를 통하여 지반의 소성파괴를 예측하는 방법을 제안, Sekiguchi and Shibata(1979)는 성토 중 측방변위 속도를 알아내어 안정관리 수행에 도움을 주었다. 국내에서도 측방이동의 문제에 대한 관심이 점차 늘면서 1970년대부터 현재까지 많은 연구가 진행되고 있는데 Hong(1994)는 연약지반의 측방유동 판정 및 교대의 측방이동을 예측할 수 있는 판정기준을 제시하였으며, Kwon(1995)은 연약지반상의 성토고, 연약층의 두께, 연약층의 전단강도 값을 변화시켜 FEM해석을 통하여 측방유동의 주요 원인을

발견하였으며 Chang(1996)는 기존의 측방유동 판정식을 우리나라 연약지반 상에 가설되어 있는 고속도로의 교량, 교대에 적용하여 기존 판정식과 비교 검토 후 서로 부합하는 판정식을 제안하였다. 또한 Lee(2008)는 EPS공법을 이용한 측방유동의 보강길이 산정에 대한 해석적 연구를 통해 2차원 해석 시 개략적인 측방이동에 대한 보강길이 산정에 도움을 주었고, Park(2013)은 압밀조건을 고려하여 다양한 조건에서의 수평변위 경향을 검토하여 교대 수평변위와 측방이동에 대한 보강범위를 산정할 수 있는 관계를 정립하였다.

연약지반 상 시공의 어려움에도 불구하고 이처럼 국내에서도 점차 측방이동에 대한 활발한 연구가 진행되어 왔다. 그 결과 측방이동에 대한 판정식 및 판정방법 또한 정형화 되어왔으며 연약지반의 개량 기술역시 발전을 거듭하고 있다.

본 연구는 연약지반 상에 성토할 경우를 가정하여 성토 높이(H), 연약지반의 깊이(Z), 연약지반의 지반정수(압축지수(C_c) 및 팽창지수(C_s)), 지하매설물과 성토부로부터 이격 거리(D)를 변동시켜 실질적으로 연약지반 상에 도로 및 구조물을 시공할 시 각 조건별에 따른 영향의 정도를 알아보고, 각 조건별 타 인자에 대한 영향성을 분석 및 연구를 실시하였다.

2. 해석조건

2.1 측방이동 판정법

연약지반의 측방유동에 대한 판정법에는 Tschebotarioff(1973)법, 측방이동지수법(F), 측방이동판정수법(I), 수정 I 지수법 등이 있지만 본 연구에 적용가능한 판정법으로 Tschebotarioff(1973)법(식 (1)), 측방이동지수법(F)(식 (2))을 선정하여 본 연구에 이용된 모델의 측방유동 유무를 판정하였다(Fig. 1 및 Fig. 2). 판정법을 통하여

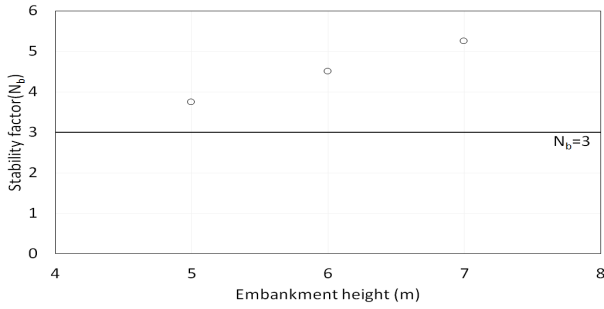


Fig. 1. Method of tschebotarioeff judgement

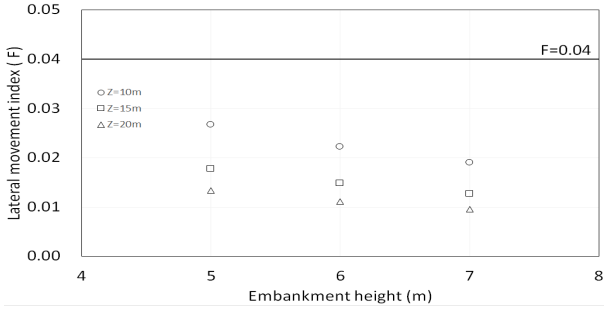


Fig. 2. Method of lateral movement index judgement

본 연구를 위하여 모델링한 단면에 대해 압밀침하에 따른 측방유동이 발생하는 사실을 확인할 수 있었다.

$$N_b = \gamma_t \frac{h}{C_u} \quad (N_b > 3 \text{ 일 경우 측방유동 발생}) \quad (1)$$

$$F = \frac{C_u}{\gamma_t h} \frac{1}{H} \quad (F \leq 0.04 \text{ 일 경우 측방유동 발생}) \quad (2)$$

2.2 해석방법

성토에 따른 연약지반의 압밀침하로 인해 발생하는 측방유동을 파악하기 위해 2차원에 대한 모델링과 해석이 가능한 유한요소 해석 프로그램인 PLAXIS 8.x를 사용하였다. 연약지반의 압밀침하로 인해 발생하는 측방유동을 알아보기 위해 연약지반에 매설되어 있는 강관은 탄성 모델(elastic model)을 적용하였으며, 연약지반보다 아래에 위치한 풍화암층과 성토부는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였고, 연약지반은 soft soil model을 적용하였다. 또한 보강길이에 영향을 주는 인자를 분석하기 위해 연약지반의 보강은 DCM치환공법을 이용하였으며 DCM(치환율 75%)의 정수 값으로 Mohr-Coulomb 모델을 적용시켰다. 유한요소 해석은 초기조건 상태를 기초에 강관만 매설되어 있는 상태로 가정하였고, 이후 단계

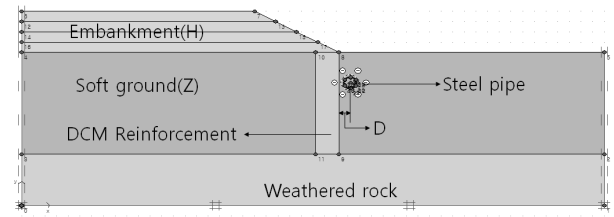


Fig. 3. Modelling example

성토를 통해 압밀이 진행되며 최소 과잉간극수압은 1.0 kN/m²로 지정하였으며, 측방이동의 허용 한계치(10cm) 보다 벗어난 변위가 발생할 시 추가적인 보강이 이루어지는 것으로 실시하였다. 지하매설물인 강관은 연약지반에 지표로부터 3m 깊이로 매설되어있는 것으로 모델링하였다. 그 대표적인 모델링 단면을 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 지반 물성치 및 해석조건

지반은 풍화암층과 연약지반 그리고 성토부로 이루어진다. 강관 및 각 지반의 물성치는 Table 1 및 Table 2와 같으며 해석조건은 Table 3과 같다.

Table 1. Properties of steel pipe

Steel pipe	
t (m)	0.05
D (m)	1
Depth d(m)	3
EA (kN/m)	2.04E+06
EI (kNm ² /m)	17
W (kN/m/m)	0.78
ν	0.18

Table 2. Ground properties

Ground properties	Soft ground	Weathered rock	Embankment	DCM (70%)
Z (m)	10, 15, 20	-	-	-
H (m)	-	5	5, 6, 7	-
γ_t (kN/m ³)	15	21	19	15
γ_{sat} (kN/m ³)	16	22	20	16
K (m/day)	1.00E-05	8.64E-03	0.864	1.00E-05
E (kN/m ²)	-	1.00E+05	3.00E+04	2.31E+04
ν	-	0.3	0.3	0.35
C (kN/m ²)	10	50	15	101
ϕ (°)	0.1	35	25	4.9
Cc	0.3, 0.5, 0.7	-	-	-
Cs	0.03, 0.05, 0.07	-	-	-
e	1	-	-	-

Table 3. Analytical condition

H (m)	Cc	D (m)	Z (m)
5	0.3	1	10
6	0.5	3	15
7	0.7	5	20
Total 81 cases			

3.1 성토높이에 따른 DCM보강길이 분석

Fig. 4~Fig. 6은 성토높이에 따른 보강길이의 증감을 표시한 그래프며, 공통적으로 성토높이 상승에 따라 보강길이 역시 증가하는 당연한 결과를 보였으며, 각 그래프에서 H에 따른 타인자별 영향성을 분석하기 위해 기울기를 산출하였다. Fig. 4에서 D=5m일 경우 기울기의 평

균은 2.2, D=3m일 경우 2.6, D=1m일 경우 3.1로 나타났고 Fig. 5에서 Z=10m일 때 기울기의 평균은 1.2, Z=15m일 경우 2.1, Z=20m일 경우 4.5로 나타났으며 Fig. 6에서는 Cc=0.3일 경우 기울기는 평균 2.5, Cc=0.5일 경우 보강길이의 평균 기울기는 2.6, Cc=0.7일 경우 보강길이의 평균은 2.8로 나타났다. 결론적으로 D의 변화 따른 최대 최소 기울기의 비는 약 1.41, Z의 변화에 따른 최대 최소 기울기의 비는 3.75, Cc의 변화에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약1.12로 나타났다. 따라서 Fig. 4~Fig. 6을 통해 H가 증가할수록 Z의 영향성이 가장 클 것으로 판단된다.

이어서 Fig. 4를 통해 H가 증가하는 경우 Z에 따른 D의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 D=5m

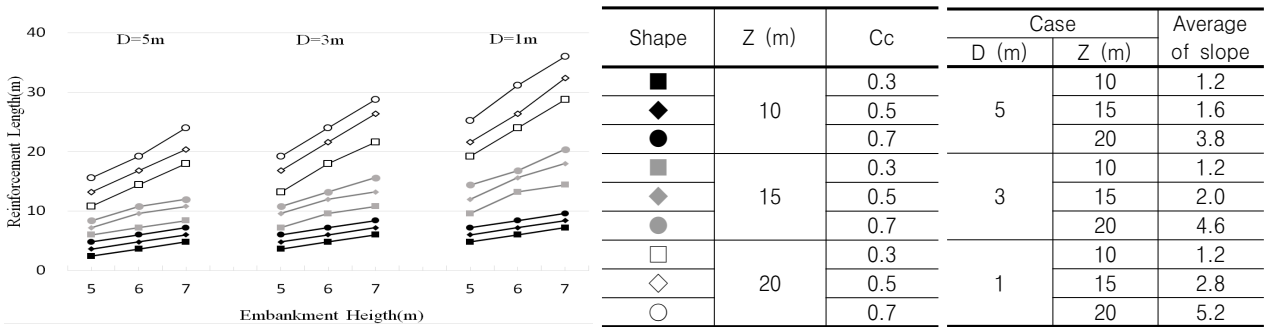


Fig. 4. Plot of L vs. H and slope of D vs. Z

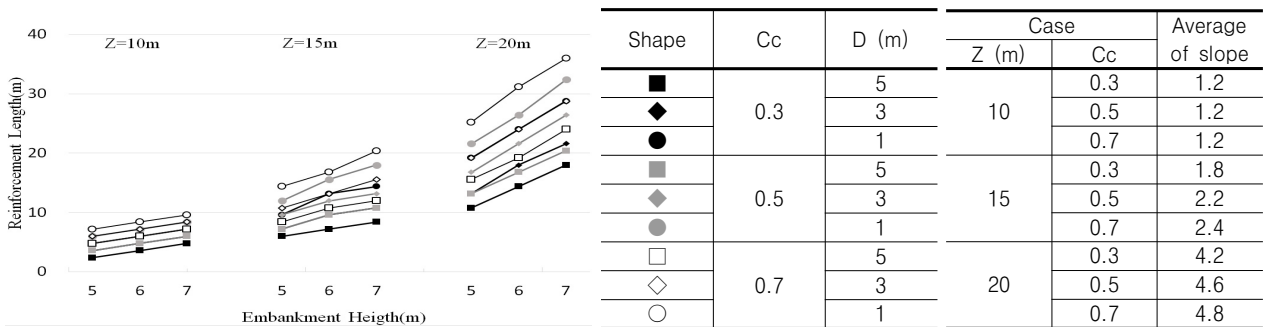


Fig. 5. Plot of L vs. H and slope of Z vs. Cc

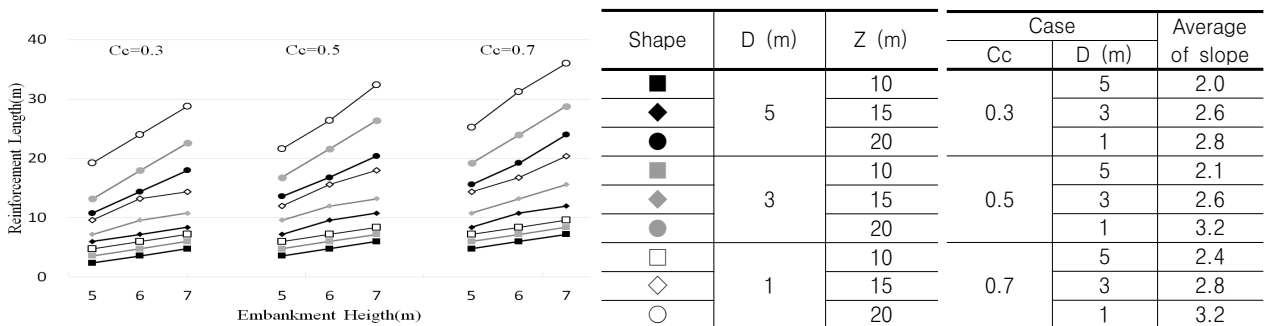


Fig. 6. Plot of L vs. H and slope of Cc vs. D

일 경우 Z에 따른 기울기는 최소 1.2에서 최대 3.8, D=3m 일 경우 Z에 따라 기울기는 최소 1.2에서 최대 4.6, D=1m 일 경우 Z에 따라 기울기는 최소 1.2에서 최대 5.2로 D가 줄어들어 따라 Z에 따른 최대 최소 기울기의 비가 최소 약 3에서 최대 4까지 났다. 이를 통해 연약지반의 심도가 깊어질수록 D의 영향성이 커지는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서는 H가 증가하는 경우 Cc에 따른 Z의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시한 결과 동일한 Z의 조건 속에서 Cc의 증가에 따른 최대 최소 기울기의 비는 최소 1.0에서 최대 1.22로 그 차이가 미미하여 Cc에 대한 Z의 영향성은 거의 없다고 판단된다.

Fig. 6에서는 H가 증가하는 경우 D에 따른 Cc의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였다. Cc=0.3으로 동일할 때 보강길이의 기울기는 D에 따라 최소 2.0에서

최대 2.8, Cc=0.5일 경우 D에 따라 최소 2.1에서 최대 3.2, Cc=0.7일 경우 최소 2.4에서 최대 3.2로 나타났다. 최대 최소 기울기의 비는 최소 1.33에서 최대 1.52 나타나는 것으로 D에 따른 Cc의 영향성은 크지 않는 것으로 판단된다.

성토높이에 따른 보강길이를 나타낸 그래프(Fig. 4~ Fig. 6)를 통해 보강길이의 증가율을 산정할 수 있었으며 그 결과 최소 증가율은 9.09%였으며 최대 증가율은 50%로 나타났다. 자세한 증가율에 대한 내용은 Table 4에 나타났다.

3.2 성토부로부터 지하매설물의 이격 거리에 따른 보강 길이 분석

Fig. 7~Fig. 9는 D에 따른 보강길이의 증감을 나타낸

Table 4. Increasing ratio (R) of L with change of H

L=Reinforcement length R=Ratio of increase																		
D (m)	Z (m)	Cc	H (m)	L (m)	R (%)	D (m)	Z (m)	Cc	H (m)	L (m)	R (%)	D (m)	Z (m)	Cc	H (m)	L (m)	R (%)	
5	10	0.3	5	2.4	-	3	15	0.3	5	3.6	-	1	15	0.3	5	4.8	-	
			6	3.6	50.00				6	4.8	33.33				6	6.0	25.00	
			7	4.8	33.33				7	6.0	25.00				7	7.2	20.00	
		0.5	5	3.6	-			0.5	5	4.8	-			0.5	5	6.0	-	
			6	4.8	33.33				6	6.0	25.00				6	7.2	20.00	
			7	6.0	25.00				7	7.2	20.00				7	8.4	16.67	
		0.7	5	4.8	-			0.7	5	6.0	-			0.7	5	7.2	-	
			6	6.0	25.00				6	7.2	20.00				6	8.4	16.67	
			7	7.2	20.00				7	8.4	16.67				7	9.6	14.29	
	15	0.3	5	6.0	-	3	15	0.3	5	7.2	-	1	15	0.3	5	9.6	-	
			6	7.2	20.00				6	9.6	33.33				6	13.2	37.50	
			7	8.4	16.67				7	10.8	12.50				7	14.4	9.09	
		0.5	5	7.2	-			0.5	5	9.6	-			0.5	5	12.0	-	
			6	9.6	33.33				6	12.0	25.00				6	15.6	30.00	
			7	10.8	12.50				7	13.2	10.00				7	18.0	15.38	
		0.7	5	8.4	-			0.7	5	10.8	-			0.7	5	14.4	-	
			6	10.8	28.57				6	13.2	22.22				6	16.8	16.67	
			7	12.0	11.11				7	15.6	18.18				7	20.4	21.43	
	20	0.3	5	10.8	-	3	20	0.3	5	13.2	-	1	20	0.3	5	19.2	-	
			6	14.4	33.33				6	18.0	36.36				6	24.0	25.00	
			7	18.0	25.00				7	21.6	20.00				7	28.8	20.00	
		0.5	5	13.2	-			0.5	5	16.8	-			0.5	5	21.6	-	
			6	16.8	27.27				6	21.6	28.57				6	26.4	22.22	
			7	20.4	21.43				7	26.4	22.22				7	32.4	22.73	
0.7		5	15.6	-	0.7			5	19.2	-	0.7			5	25.2	-		
		6	19.2	23.08				6	24.0	25.00				6	31.2	23.81		
		7	24.0	25.00				7	28.8	20.00				7	36.0	15.38		
Average of slope			25.78			Minimum of slope			11.11			Maximum of slope			50.00			

그래프이며, 공통적으로 D를 제외한 이외의 조건들이 같을 경우 이격 거리가 줄어들어 따라 보강길이가 증가하는 당연한 결과를 보였다. 또한 D 조건의 변화에 따라 타 인자별 영향성을 파악하기 위해 Fig. 7~Fig. 9 그래프의 인자별 기울기를 산정하였다. Fig. 7에서 H=5m인 경우 평균 1.3의 기울기를 보였고 H=6m인 경우 1.5, H=7m인 경우 평균 1.8의 기울기를 보였으며, Fig. 8에서 Z=10m인 경우 평균 0.6의 기울기를 가졌고, Z=15m인 경우 평균 1.5, Z=20m인 경우 평균 2.6의 기울기를 보였다. 또한 Fig. 9에서 Cc=0.3일 때 기울기는 평균 1.4, Cc=0.5일 때 1.5, Cc=0.7일 때 평균기울기는 1.7로 나타났다. 요약하자면 H에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약 1.38, Z에 따른 기울기는 약 4.3, Cc에 따른 기울기는

1.2로 나타난 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 이격 거리의 감소에 따라 Z의 영향성이 가장 큰 것으로 판단된다.

Fig. 7에서는 이격 거리가 감소하는 경우 Z에 따른 H의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 H=5m인 경우 Z에 따라 최소 0.6에서 최대 2.2의 기울기가 나타났으며, H=6m인 경우 Z에 따라 최소 0.6에서 최대 2.4, H=7m인 경우 최소 0.6에서 최대 2.9로 최대 기울기와 최소기울기가 약 4배 차이가 났으며 Z가 커질수록 기울기의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Z가 커질수록 H의 영향성은 커지는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 이격 거리가 감소하는 경우 Cc에 따른 Z의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으나 Z의 조건

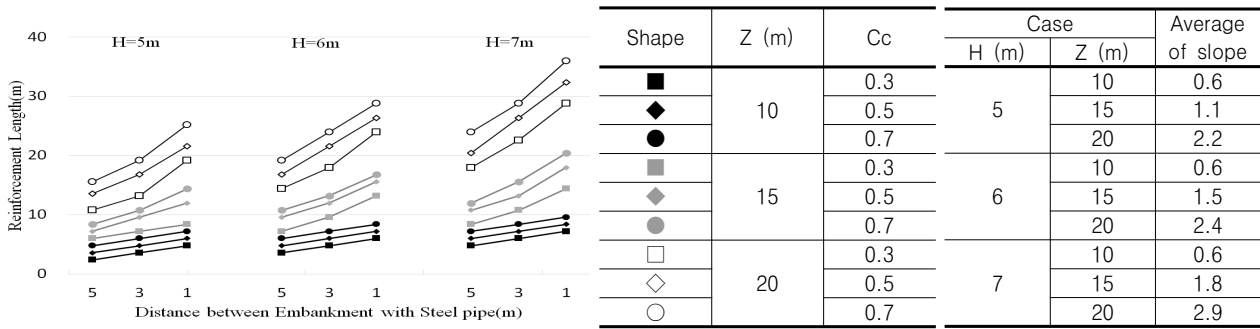


Fig. 7. Plot of L vs. H and slope of H vs. Z

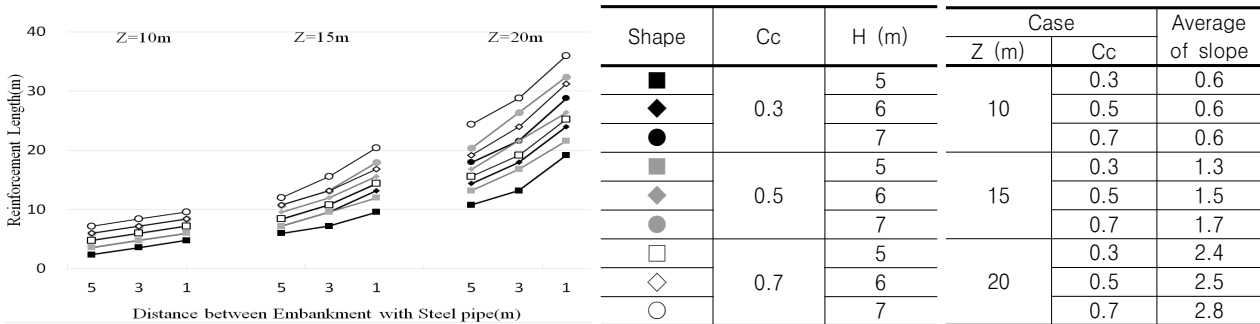


Fig. 8. Plot of L vs. H and slope of Z vs. Cc

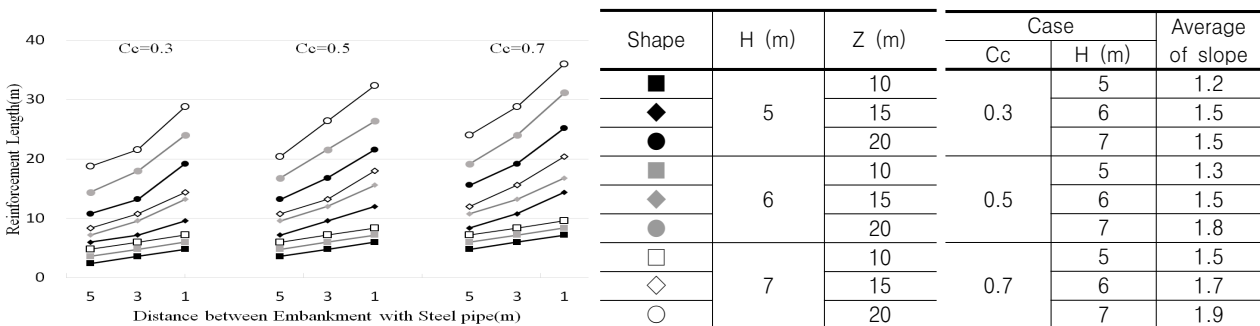


Fig. 9. Plot of L vs. H and slope of Cc vs. H

이 동일할 경우 Cc의 증가에 따라 최대 최소 기울기의 비는 1.0에서 1.17로 거의 나타나지 않았다. 이 결과를 통해 Cc의 증가에 따른 Z의 영향성은 거의 없다고 판단된다.

Fig. 9는 이격 거리가 감소하는 경우에 H에 따른 Cc의 영향성을 파악하기 위한 분석을 하였으며, Cc=0.3일 경우 H의 변화에 따른 기울기는 최소 1.2에서 최대 1.5, Cc=0.5일 때 기울기는 최소 1.3에서 최대 1.8, Cc=0.7일 경우 기울기는 최소 1.5에서 최대 1.9로 최대 최소 기울기의 비는 1.27~1.38로 차이는 크게 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Cc는 H에 따른 보강길이 증가에 대해 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7~Fig. 9를 통해 D에 따른 보강길이의 증가율을 산출할 수 있었으며, 그 결과 최소 증가율은 7.14%로 나왔고 최대 증가율은 25%로 산출되었다. 자세한 증가율에 대한 내용은 Table 5에 나타났다.

3.3 연약지반의 심도에 따른 보강길이 분석

Fig. 10~Fig. 12는 연약지반의 심도별 보강길이의 증감을 나타내었으며, Z의 증가에 따라 보강길이가 증가하는 당연한 결과를 보였다. Z 조건의 변화에 따라 타 인자별 영향성을 파악하기 위해 Fig. 10~Fig. 12 그래프의 인자별 기울기를 산정하였다. Fig. 10에서 H=5m인 경우 평균 1.2의 기울기를 보였으며, H=6m인 경우 1.5, H=7m인 경우 평균 1.9의 기울기를 보였고, Fig. 11에서 D=5m인 경우 평균 1.2의 기울기를 가졌고, D=3m인 경우 평균 기울기는 1.5, Z=1m인 경우 평균 2.0의 기울기를 보였다. 또한 Fig. 12에서 Cc=0.3일 때 기울기는 평균 1.4, Cc=0.5일 때 평균 기울기는 1.6, Cc=0.7일 때 평균기울기는 1.8로 나타났다. 결론적으로 최대 최소 기울기의 비는 H에 따라 약 1.58, D에 따라 약 1.67, Cc

Table 5. Increasing ratio (R) of L with change of D

L=Reinforcement length R=Ratio of increase																						
H (m)	Z (m)	Cc	D (m)	L (m)	R (%)	H (m)	Z (m)	Cc	D (m)	L (m)	R (%)	H (m)	Z (m)	Cc	D (m)	L (m)	R (%)					
5	10	0.3	5	2.4	-	6	10	0.3	5	3.6	-	7	10	0.3	5	4.8	-					
			3	3.6	25.00				3	4.8	16.67				3	6.0	12.50					
			1	4.8	16.67				1	6.0	12.50				1	7.2	10.00					
		0.5	5	3.6	-			0.5	5	4.8	-			0.5	5	6.0	-	0.5	5	6.0	-	
			3	4.8	16.67				3	6.0	12.50				3	7.2	10.00		3	7.2	10.00	
			1	6.0	12.50				1	7.2	10.00				1	8.4	8.33		1	8.4	8.33	
		0.7	5	4.8	-			0.7	5	6.0	-			0.7	5	6.0	-	0.7	5	7.2	-	
			3	6.0	12.50				3	7.2	10.00				3	7.2	10.00		3	8.4	8.33	
			1	7.2	10.00				1	8.4	8.33				1	8.4	8.33		1	9.6	7.14	
	15	0.3	5	6.0	-		15	0.3	5	7.2	-		15	0.3	5	7.2	-	15	0.3	5	8.4	-
			3	7.2	10.00				3	9.6	16.67				3	10.8	14.29			3	10.8	14.29
			1	8.4	8.33				1	13.2	18.75				1	14.4	16.67			1	14.4	16.67
		0.5	5	7.2	-			0.5	5	9.6	-			0.5	5	9.6	-		0.5	5	10.8	-
			3	9.6	16.67				3	12.0	12.50				3	13.2	11.11			3	13.2	11.11
			1	12.0	12.50				1	15.6	15.00				1	18.0	18.18			1	18.0	18.18
		0.7	5	8.4	-			0.7	5	10.8	-			0.7	5	10.8	-		0.7	5	12.0	-
			3	10.8	14.29				3	13.2	11.11				3	15.6	15.00			3	15.6	15.00
			1	14.4	16.67				1	16.8	13.64				1	20.4	15.38			1	20.4	15.38
	20	0.3	5	10.8	-		20	0.3	5	14.4	-		20	0.3	5	14.4	-	20	0.3	5	18.0	-
			3	13.2	11.11				3	18.0	12.50				3	22.6	12.78			3	22.6	12.78
			1	19.2	22.73				1	24.0	16.67				1	28.8	13.72			1	28.8	13.72
		0.5	5	13.6	-			0.5	5	16.8	-			0.5	5	16.8	-		0.5	5	20.4	-
			3	16.8	11.76				3	21.6	14.29				3	26.4	14.71			3	26.4	14.71
			1	21.6	14.29				1	26.4	11.11				1	32.4	11.36			1	32.4	11.36
0.7		5	15.6	-	0.7	5		19.2	-	0.7	5	19.2		-	0.7	5	24.0		-			
		3	19.2	11.54		3		24.0	12.50		3	28.8		10.00		3	28.8		10.00			
		1	25.2	15.63		1		28.8	10.00		1	36.0		12.50		1	36.0		12.50			
Average of slope				13.25		Minimum of slope				7.14		Maximum of slope				25.00						

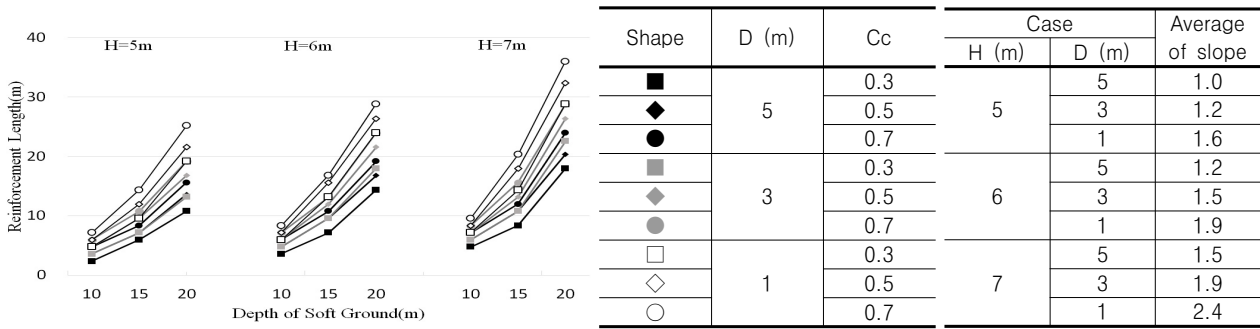


Fig. 10. Plot of L vs. Z and slope of H vs. D

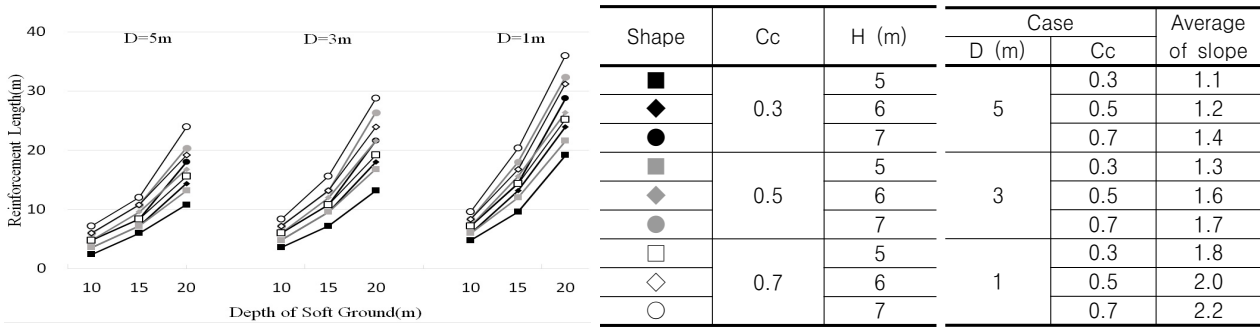


Fig. 11. Plot of L vs. Z and slope of D vs. Cc

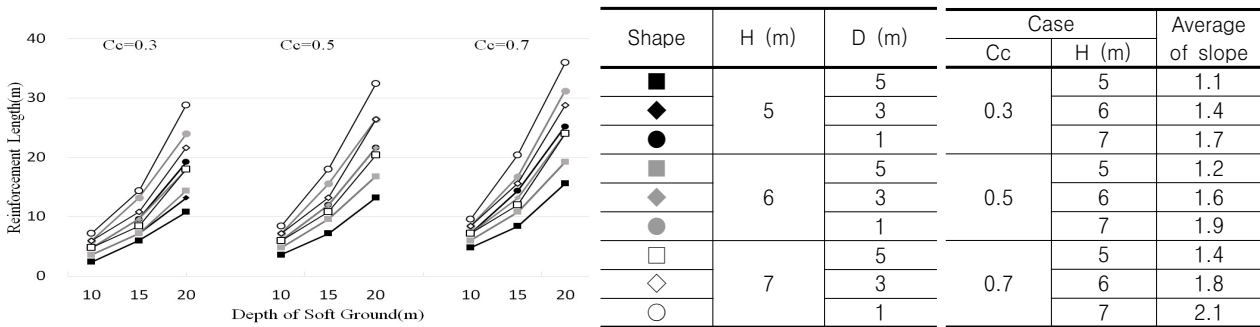


Fig. 12. Plot of L vs. Z and slope of Cc vs. H

에 따라 1.29로 나타난 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 연약지반의 심도가 깊어짐에 따라 이격 거리의 영향성이 가장 큰 것으로 판단된다.

Fig. 10에서는 연약지반의 심도가 깊어지는 경우 D에 따른 H의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 H=5m인 경우 D에 따라 최소 1.0에서 최대 1.6의 기울기가 나타났으며, H=6m인 경우 Z에 따라 최소 1.2에서 최대 1.9, H=7m인 경우 최소 1.5에서 최대 2.4로 나타났고, 최대 최소 기울기의 비는 평균적으로 1.6 으로 나타났다. 따라서 D의 증가에 따른 H의 영향성은 크지 않은 것으로 판단되나 수치적으로 Fig. 10~Fig. 12 중 가장 크게 나타났다.

Fig. 11은 연약지반의 심도가 깊어지는 경우 Cc에 따

른 D의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 그 결과 D의 조건이 동일할 경우 Cc의 증가에 따라 최대 최소 기울기의 비는 약 1.22~1.31로 미미한 변화를 보였다. 이 결과를 통해 Cc에 따라 증가하는 보강길이에 대해서 D의 영향성은 거의 없다고 판단된다.

Fig. 12는 연약지반의 심도가 깊어지는 경우 H에 따른 Cc 보강길이에 대한 분석을 하였으며, Cc=0.3일 경우 H의 상승에 따라 그 기울기는 최소 1.1에서 최대 1.7, Cc=0.5일 경우 최소 1.2에서 최대 1.9의 기울기를 가졌으며, Cc=0.7일 경우 최소 1.4에서 최대 2.1로 나타났으며 Cc에 따른 최대 최소 기울기의 비를 살펴보면 약 1.50~1.58로 나타났다. 이를 통해 H에 따른 보강길이에 Cc의 영향성은 크지 않다는 것으로 판단된다.

Table 6. Increasing ratio (R) of L with change of Z

L=Reinforcement length R=Ratio of increase																	
H (m)	D (m)	Cc	Z (m)	L (m)	R (%)	H (m)	D (m)	Cc	Z (m)	L (m)	R (%)	H (m)	D (m)	Cc	Z (m)	L (m)	R (%)
5	5	0.3	10	2.4	-	6	5	0.3	10	3.6	-	7	5	0.3	10	4.8	-
			15	6.0	30.00				15	7.2	20.00				15	9.6	20.00
			20	10.8	16.00				20	13.2	16.67				20	19.2	20.00
		0.5	10	3.6	-			0.5	10	4.8	-			0.5	10	6.0	-
			15	7.2	20.00				15	9.6	20.00				15	12.0	20.00
			20	13.6	17.78				20	16.8	15.00				20	21.6	16.00
		0.7	10	4.8	-			0.7	10	6.0	-			0.7	10	7.2	-
			15	8.4	15.00				15	10.8	16.00				15	14.4	20.00
			20	15.6	17.14				20	19.2	15.56				20	25.2	15.00
	3	0.3	10	3.6	-		3	0.3	10	4.8	-		3	0.3	10	6.0	-
			15	7.2	20.00				15	9.6	20.00				15	13.2	24.00
			20	14.4	20.00				20	18.0	17.50				20	24.0	16.36
		0.5	10	4.8	-			0.5	10	6.0	-			0.5	10	7.2	-
			15	9.6	20.00				15	12.0	20.00				15	15.6	23.33
			20	16.8	15.00				20	21.6	16.00				20	26.4	13.85
		0.7	10	6.0	-			0.7	10	7.2	-			0.7	10	8.4	-
			15	10.8	16.00				15	13.2	16.67				15	16.8	20.00
			20	19.2	15.56				20	24.0	16.36				20	28.8	14.29
	1	0.3	10	4.8	-		1	0.3	10	6.0	-		1	0.3	10	7.2	-
			15	8.4	15.00				15	10.8	16.00				15	14.4	20.00
			20	18.0	22.86				20	22.6	21.85				20	28.8	20.00
		0.5	10	6.0	-			0.5	10	7.2	-			0.5	10	8.4	-
			15	10.8	16.00				15	13.2	16.67				15	18.0	22.86
			20	20.4	17.78				20	26.4	20.00				20	32.4	16.00
0.7		10	7.2	-	0.7	10		8.4	-	0.7	10	9.6		-			
		15	12.0	13.33		15		15.6	17.14		15	20.4		22.50			
		20	24.0	20.00		20		28.8	16.92		20	36.0		15.29			
Average of slope			18.25			Minimum of slope			13.33			Maximum of slope			30.00		

Fig. 10~Fig. 12를 통해 Z에 따른 보강길이의 증가율을 산출 할 수 있었으며, 그 결과 최소 증가율은 13.33%, 최대 증가율은 30%로 산출되었다. 자세한 증가율에 대한 내용은 Table 6에 나타냈다.

3.4 압축지수에 따른 보강길이 분석

Fig. 13~Fig. 15는 압축지수에 따른 보강길이의 증감을 나타내었으며, Cc값의 증가에 따라 보강길이 역시 미소하게 증가하는 결과를 보였다. Cc 조건의 변화에 따라 타 인자별 영향성을 파악하기 위해 Fig. 13~Fig. 15 그래프의 인자별 기울기를 산정하였다. Fig. 13에서 H=5m인 경우 평균 1.0의 기울기를 보였으며, H=6m인 경우 1.0, H=7m인 경우 평균 1.1의 기울기를 보였고,

Fig. 14에서 D=5m인 경우 평균 0.9의 기울기를 가졌고, D=3m인 경우 평균 기울기는 1.1, Z=1m인 경우 평균 1.2의 기울기를 보였다. 또한 Fig. 15에서 Z=10m일 때 기울기는 평균 0.6, Z=15m일 때 평균 기울기는 1.0, Z=20m일 때 평균기울기는 1.5로 나타났다. 결론적으로 H에 따른 최대 최소 기울기의 비는 1.1, D에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약 1.3, Z에 따른 최대 최소 기울기의 비는 2.5로 나타난 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 압축지수 상승에 따른 보강길이의 영향성은 연약지반의 심도가 가장 많이 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 13에서는 압축지수가 증가하는 경우 D에 따른 H의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 H=5m인 경우 D에 따라 최소 0.8에서 최대 1.1의 기울기가 나타났으며, H=6m인 경우 Z에 따라 최소 0.9에서 최대

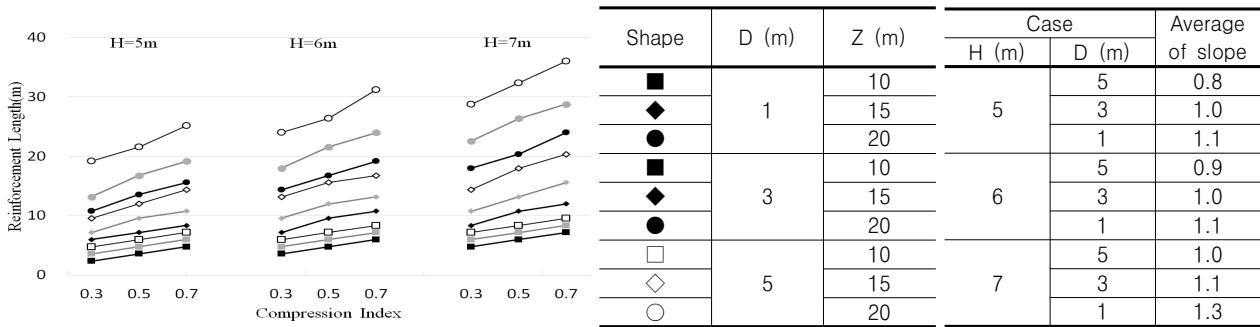


Fig. 13. Plot of L vs. Cc and slope of H vs. D

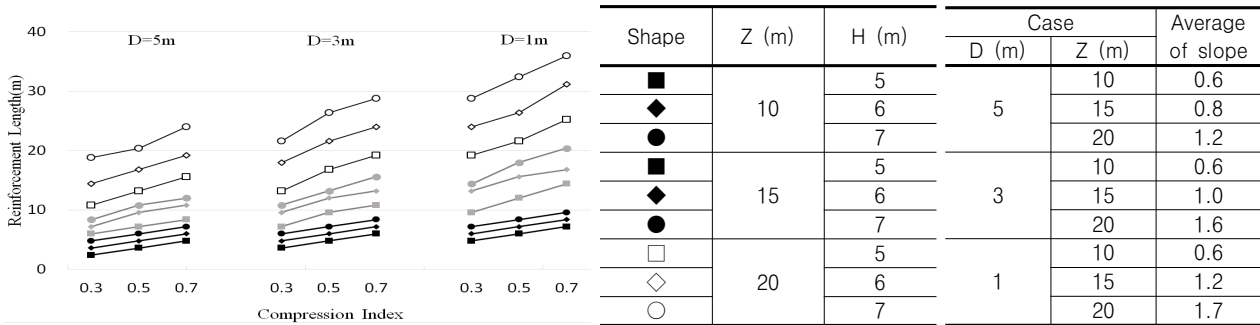


Fig. 14. Plot of L vs. Cc and slope of D vs. Z

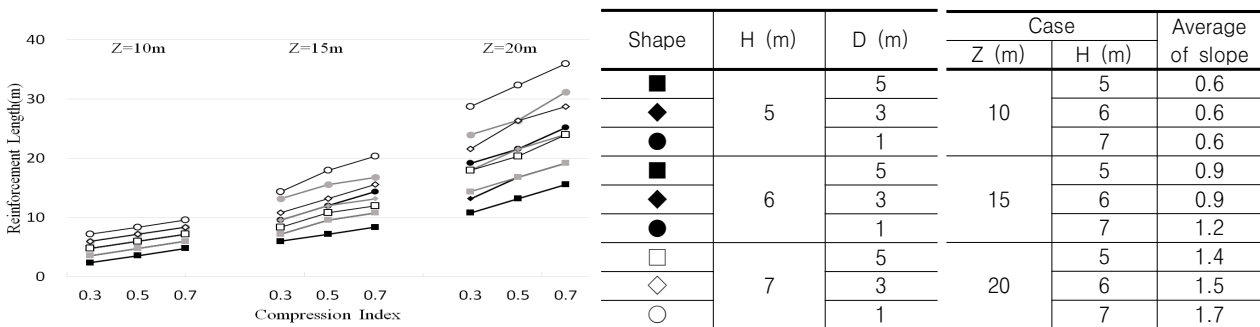


Fig. 15. Plot of L vs. Cc and slope of Z vs. H

1.1, H=7m인 경우 최소 1.0에서 최대 1.3으로 나타났고, 최대 최소 기울기의 비는 약 1.22~1.38로 나타났다. 따라서 D의 증가에 따른 H의 영향성은 크지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 압축지수가 증가하는 경우 Z에 따른 D의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며 D=5m일 때 보강길이의 기울기는 최소 0.6에서 최대 1.2, D=3m일 때 기울기는 최소 0.6에서 최대 1.6, D=1m일 때 기울기는 최소 0.6에서 최대 1.7로 이격 거리가 가까워짐에 따라 기울기의 편차가 점점 증가하는 것으로 확인되었다. 최대 최소 기울기의 비는 약 2.0~2.83로 나타났으며 이 결과를 통해 Z에 따라 증가하는 보강길이에 대해서 D의 영향성은 큰 것으로 판단된다.

Fig. 15는 압축지수가 증가하는 경우 H에 따른 Z의 영향성을 파악하기 위한 분석을 실시하였으며, Z=10m일 경우 H의 상승에 따라 그 기울기는 전체적으로 0.6으로 나왔으며, Z=15m일 경우 최소 0.9에서 최대 1.2의 기울기를 가졌으며, Z=20m일 경우 최소 1.4에서 최대 1.7로 나타났으며 최대 최소 기울기의 비는 약 1.0~1.3으로 나타났다. 이를 통해 H에 따른 보강길이 증가에 대한 Z의 영향성은 거의 없는 것으로 판단된다.

Fig. 13~Fig. 15를 통해 Cc에 따른 보강길이의 증가율을 산출 할 수 있었으며, 그 결과 최소 증가율은 3.85%, 최대증가율은 25%로 산출되었다. 자세한 증가율에 대한 내용은 Table 7에 나타났다.

Table 7. Increasing ratio (R) of L with change of Cc

L=Reinforcement length R=Ratio of increase																							
H (m)	D (m)	Z (m)	Cc	L (m)	R (%)	H (m)	D (m)	Z (m)	Cc	L (m)	R (%)	H (m)	D (m)	Z (m)	Cc	L (m)	R (%)						
5	5	10	0.3	2.4	-	6	5	10	0.3	3.6	-	7	5	10	0.3	4.8	-						
			0.5	3.6	25.00				0.5	4.8	16.67				0.5	6.0	12.50						
			0.7	4.8	16.67				0.7	6.0	12.50				0.7	7.2	10.00						
		0.3	6.0	-	15			0.3	7.2	-	15			0.3	7.2	-	15	0.3	8.4	-			
		0.5	7.2	10.00				0.5	9.6	16.67				0.5	10.8	14.29							
		0.7	8.4	8.33				0.7	10.8	6.25				0.7	12.0	5.56							
		0.3	10.8	-	20			0.3	14.4	-	20			0.3	14.4	-	20	0.3	18.0	-			
		0.5	13.6	12.96				0.5	16.8	8.33				0.5	20.4	6.67							
		0.7	15.6	7.35				0.7	19.2	7.14				0.7	24.0	8.82							
		3	10	0.3	3.6			-	3	10	0.3			4.8	-	3	10	0.3	14.4	-			
				0.5	4.8			16.67			0.5			6.0	12.50			0.5	18.0	12.50			
				0.7	6.0			12.50			0.7			7.2	10.00			0.7	24.0	16.67			
	0.3		7.2	-	15		0.3	9.6		-	15		0.3	9.6	-		15	0.3	16.8	-			
	0.5		9.6	16.67			0.5	12.0		12.50			0.5	21.6	14.29								
	0.7		10.8	6.25			0.7	13.2		5.00			0.7	26.4	11.11								
	0.3		13.2	-	20		0.3	18.0		-	20		0.3	18.0	-		20	0.3	19.2	-			
	0.5		16.8	13.64			0.5	21.6		10.00			0.5	24.0	12.50								
	0.7		19.2	7.14			0.7	24.0		5.56			0.7	28.8	10.00								
	1		10	0.3	4.8		-	1		10	0.3		6.0	-	1		10	0.3	6.0	-			
				0.5	6.0		12.50				0.5		7.2	10.00				0.5	7.2	10.00			
				0.7	7.2		10.00				0.7		8.4	8.33				0.7	8.4	8.33			
		0.3	9.6	-	15		0.3		13.2	-	15		0.3	13.2		-	15	0.3	10.8	-			
		0.5	12.0	12.50			0.5		15.6	9.09			0.5	13.2		11.11							
		0.7	14.4	10.00			0.7		16.8	3.85			0.7	15.6		9.09							
		0.3	19.2	-	20		0.3		24.0	-	20		0.3	24.0		-	20	0.3	22.6	-			
		0.5	21.6	6.25			0.5		26.4	5.00			0.5	26.4		8.41							
		0.7	25.2	8.33			0.7		31.2	9.09			0.7	28.8		4.55							
		Average of slope			10.51				Minimum of slope				3.85			Maximum of slope			25.00				

4. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석을 이용하여 연약지반의 압축지수, 연약지반의 심도, 성토 높이, 성토부로부터 지하 매설물까지의 이격 거리를 변화시켜 연약지반의 필요보강길이와 각 인자별 상관관계를 알아보기 위하여 심층혼합공법을 이용한 유한요소 해석을 실시하였으며, 그 해석 결과를 이용하여 그래프를 작성, 그래프의 기울기를 통해 보강길이의 경향성 및 조건별 보강길이의 증가율을 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 성토높이에 따른 보강길이 그래프를 통해 성토높이에 따라 보강길이의 증가에 큰 영향을 미치는 인자

는 연약지반의 심도이며 이는 그래프의 기울기가 연약지반의 깊이가 깊어질수록 성토높이의 증가에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약3.75로 다른 인자보다 가장 큰 수치를 기록한 것으로 알 수 있다.

- (2) 성토부로부터 강관의 이격 거리에 따른 보강 길이 그래프를 통해 이격 거리에 따른 보강길이 증가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 연약지반의 심도였으며 보강길이의 증감 그래프 상에서 연약지반의 심도가 깊어질수록 이격 거리에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약 4.3으로 나타났다.
- (3) 연약지반의 심도에 따른 보강 길이의 그래프를 통해 연약지반 심도에 따른 보강길이 증가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 이격 거리였으며 이격 거리가 가까워질수록 연약지반 심도에 따른 최대 최소

기울기의 비는 약 1.67로 나타났다.

- (4) 압축지수의 증가에 따른 보강 길이 그래프에서 압축지수에 따른 보강길이 증가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 연약지반 심도였으며 연약지반 심도가 깊어질수록 압축지수 증가에 따른 최대 최소 기울기의 비는 약 2.5로 나타났다.
- (5) 보강길이 증가율을 분석하였을 때 성토높이에 따른 보강길이 증가율은 최소 9%에서 최대 50%, 이격거리에 따른 보강길이 증가율은 최소 7%에서 최대 25%, 연약지반 심도에 따른 보강길이 증가율은 최소 13%에서 최대 30%, 압축지수에 따른 보강길이 증가율은 최소 3%에서 최대 25%로 나타났으며 평균적으로 성토높이가 보강길이에 가장 영향을 많이 미치는 것으로 판단된다.
- (6) 연약지반의 심도는 다른 인자에 다른 보강길이 증가에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 판단되며, 증가율을 비교하였을 때 큰 증가율을 보인 인자는 성토높이이며 압축지수에 따른 증가율이 전반적으로 가장 낮은 수치를 보였다.
- (7) 본 연구를 통해 연약지반 상 시공을 실시할 경우 증가율이 가장 높게 나타난 성토높이와, 다른 인자의 보강길이 증가에 가장 영향을 미치는 연약지반의 심도를 정밀하게 파악하지 않은 채 설계 및 시공을 실시할 경우 공사비의 과다지출에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임으로 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", *John Wiley and Sons, Inc, New York*, 2nd Ed., pp.729.
2. Skempton, A.W. and Jones, O.T. (1944) "Notes on the Compressibility of Clays" *Quarterly Journal of the Geological Society*, pp.100, pp.119-135.
3. Choi, S.M. (2000), "A Study on the Relationship between the Physical Properties of Soil and the Compression Index of Soft Clay in Gyungnam Region", *Master's Thesis*, Changwon National University.
4. Peck, R.B. (1969), "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", *Geotechnique*, Volume 19 Issue 2, pp.171-187.
5. Tschebotarioff, G.P. (1973), "Foundations, Retaining and Earth Structure", *McGraw-Hill*, New York, pp.415-457.
6. Tominaga and Hashimoto (1974), "On the Embankment Control Through the Field Measurement of Lateral Movements", *The Japanese Geotechnical Society*, No.830, pp.43-51.
7. Matsuo, M. and Kawamura, K. (1977), "Diagram of Construction Control of Embankment on Soft Ground. Soil and Foundations", *Soil and Foundations*, Volume 17, No.3.
8. Sekiguchi, H. and Shibata, T. (1979), "Undrained Behaviour of Soft Clay under Embankment Loading", *Proc. 3rd Int. Conf. on Numer. Meth. in Geotech. Engrg.*
9. Hong, W.P. (1994), "A Study on Lateral Movement of Bridge Abutment on Soft Ground", *Journal of the Korean geotechnical society*, Volume 10, No.4, pp.53-65.
10. Kwon, S.J. (1995), "A Numerical Analysis of Lateral Flow in Soft Foundation under Emankment", *Master's Thesis*, Chonnam National University.
11. Chang, Y.C. and Choi, Y.C. (1996), "A Study on Application of Discriminant Equations In Korea", *Journal of the Korean geotechnical society*, Volume 1996, No.3, pp.249-256.
12. Lee, H.G. (2008), "An Analytical Study of Reinforcement Length in the Protection Method of Lateral Movement", *Doctor's Thesis*, Changwon National University.
13. Park, C.S., Kim, J.H., and Baek, J.S. (2013), "A Study on the Influence Range of Lateral Movement of Abutment on the Soft Clay by MCC Model", *Korean geotechnical society*, Volume 33, No.1.

Received : October 30th, 2018

Revised : December 3rd, 2018

Accepted : December 4th, 2018